DOI:10.13866/j.azr.2024.03.06

内蒙古伊敏盆地地下水水化学特征及其成因

王平顺[1,2]， 苗新岳[3]， 燕亚平[4]， 董生旺[5]， 董少刚[1,2]

（1. 内蒙古大学生态与环境学院，内蒙古 呼和浩特 010021；2. 内蒙古自治区河流与湖泊生态重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010021；3. 东北农业大学资源环境学院，黑龙江 哈尔滨 150030；4. 内蒙古生态环境科学研究院有限公司，内蒙古 呼和浩特 010015；5. 内蒙古第一水文地质工程地质勘查有限责任公司，内蒙古 呼和浩特 010020）

摘 要： 采矿活动强烈地改变了区域水文循环特征并对地下水化学特征产生明显影响，揭示煤矿开发影响下的地下水系统演变特征，可为煤矿区的生态环境保护和可持续发展提供理论支持。本文以内蒙古伊敏盆地为例，在水文地质调查的基础上结合地下水流动系统理论、Piper三线图、Gibbs图、离子比例系数、矿物饱和指数等分析方法探究煤矿开采活动干扰下的地下水化学变化特征。结果表明：研究区水环境整体上呈弱碱性，采矿显著影响区和非影响区内检测指标存在着不同程度的超标情况。盆地内煤矿开采疏排地下水加速了区域水文循环速度，使显著影响区水质向淡化方向演化。露天煤矿的开发使得原本封闭的地下水系统变得开放，含硫煤以及硫铁矿氧化产酸激发的一系列水-岩相互作用是区域地下水化学特征发生变化的主因。盆地地下水的水化学成分受蒸发浓缩作用和水-岩相互作用的影响。沿着地下水的流动方向，显著影响区内水化学类型是从HCO_3-Ca·Na型向HCO_3-Ca型变化，TDS和Cl^-浓度呈现出下降趋势；在非影响区内是从HCO_3-Ca·Na型向Cl-Ca·Mg型转变，TDS和Cl^-浓度表现为上升趋势。

关键词： 地下水；水化学特征；人类活动影响；水-岩相互作用；伊敏盆地

地下水以其覆盖面积广，水质稳定且优良等特点，而成为人类生产生活及维护区域生态环境安全的重要水源[1]。在自然界中，地下水在长时间的地质作用下形成了稳定的水化学特征，然而人类活动能够在短时间内使其发生显著的改变[2-4]。例如，在天然状态下大型盆地的山前倾斜平原由于渗透良好、地下水流速快而往往形成优质淡水[5]；地势平坦的平原和盆地中部由于地下水径流缓慢、蒸发强烈而容易形成高盐水[6]；人类生产活动中大量抽排地下水，污水偷排，未经处理的固体废弃物直接堆弃，以及农药的大量使用等都会对天然的地下水系统造成负效应[7-8]。特别是人类大规模的矿山开发会对区域水文循环造成破坏，从而使地下水资源可利用量大幅度减少，并且直接或者间接使其所支撑的环境生态系统退化[9]。矿山开发实质上是一种人为干预自然系统的过程，矿山显现的生态地质环境负效应是自然环境系统向自然-人工复合系统转化过程中各种响应的综合体现[10]。煤矿区域已成为全球范围内生态系统遭受破坏最为严重的区域，煤矿山开采疏排地下水引起的地下水流动系统改变是导致矿区生态系统发生演化的主要驱动力[11]。

煤矿开采造成矿区含水层结构发生改变，破坏了地下水的补给和存储条件，从而改变了区域水文循环特征[12]。矿坑废水、煤矸石淋溶液普遍为酸性水体，并溶解了大量的金属元素，如果不能妥善处理会对周边环境造成难以修复的影响[13]。如Qiao等[14]研究发现，采矿过程中的排水行为会造成区域地下水位下降以及水资源枯竭，对附近的环境和生态经济造成影响。Monika等[15]在研究印度中部科尔巴煤田地区的地下水时发现，露天煤矿所排的矿

收稿日期： 2023-11-13； **修订日期：** 2023-12-28
基金项目： 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZZ23089)；国家自然科学基金项目(42267025)
作者简介： 王平顺(2000-)，男，硕士研究生，主要从事生态水文地质研究. E-mail: yuuwps@163.com
通讯作者： 董少刚. E-mail: groundwater@163.com

坑水和渗滤液pH值呈较强酸性且含有大量的重金属。Kumar等[16]发现,煤炭开采活动中产出的煤矸石渗滤液富含较高浓度的铁、铅和锌元素,对地下水环境有严重的危害。Fallavena等[17]揭示了煤层具有产酸的潜力,可使矿区地下水钙、镁等离子超标严重。

本文以内蒙古伊敏盆地为研究对象,基于地下水流动系统理论,采用Gibbs图、Piper三线图、离子比例系数以及矿物饱和指数等分析方法,揭示煤矿开发影响下的地下水系统演变特征,为煤矿区的生态环境保护和可持续发展提供理论支持。

1 研究区概况

伊敏盆地位于内蒙古伊敏河中下游地区(48°32′22″~48°49′52″N,119°38′20″~119°52′11″E),是由阿吉洪德断裂和伊敏河断裂活动形成的断陷含煤盆地(图1)。该地区属温带大陆性季风气候,年均气温

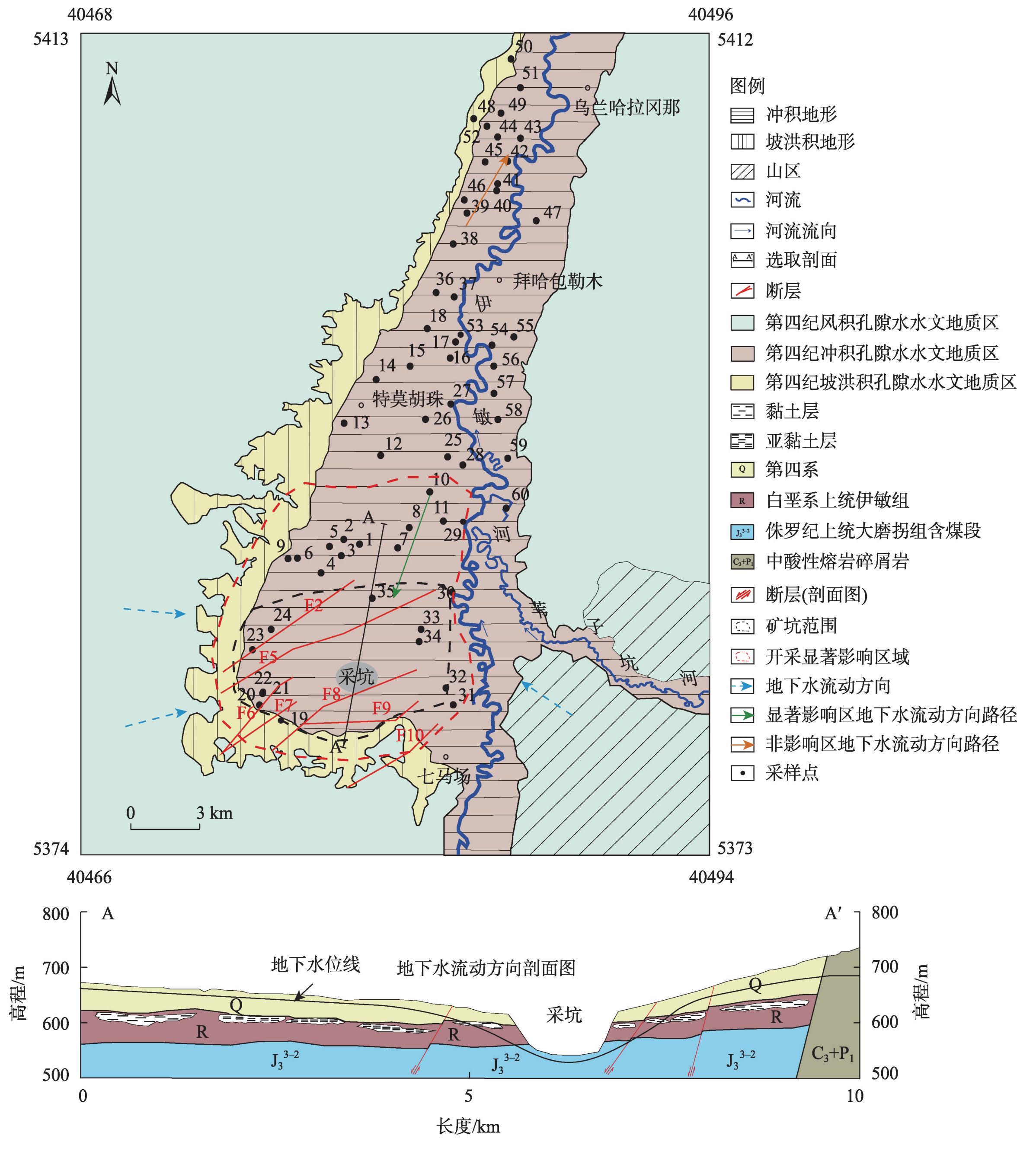


图1 伊敏盆地地形地貌、水文地质以及采样点分布

Fig. 1 The topography, hydrogeology and sampling point distribution of Yimin Basin

为-2 ℃。降水主要集中在夏季6—8月，年均降水量为354 mm，年均蒸发量为1318 mm。矿区附近最大河流是伊敏河，结冰期是在11月上旬至次年3月初，流动方向是自南向北流。盆地内原有湖泊13个，总湖水面积约6.9 km^2，近年来由于采矿活动疏排地下水，导致区内多个湖泊水域面积缩小甚至已干涸，目前仅余湖水面积1.1 km^2[18]。

受区域构造和沉积环境的影响，盆地含水系统呈现多层结构，主要分为第四系砂砾石潜水含水层、白垩系上统伊敏组和侏罗纪上统大磨拐组煤系承压含水层。白垩系上统伊敏组的15号和16号煤系地层分布广泛、厚度大，其不仅是煤炭资源开发的关键煤层，同时也是本区最主要的含水层。盆地内隔水层主要由黏土层、泥岩层、粉砂质黏土层构成，但是由于其分布不连续，因此盆地内潜水和承压水具有紧密的水力联系[19]。

研究区地下水由盆地周边的丘陵和台地向中部平原径流，水位高程在560~674 m。大气降水和伊敏河水是区域地下水的主要补给来源。受煤矿开发影响，在盆地南部形成以采坑为中心的降落漏斗，漏斗中心水位降深114 m[20]，周边地下水向漏斗中心汇流，以疏干水的形式排放。盆地北部区域受煤矿开发影响小，地下水主要由南向北、由东西两侧向伊敏河径流排泄。

2 样品采集与检测

2016—2017年在内蒙古伊敏盆地共采集地下水样60组，采样点选择正在使用的民井（手压井或机电井）和矿区疏干井。采样过程遵循《地下水环境监测技术规范》HJ/T（164-2004）中的技术要求来对采样点水样进行采集和保存。水样采集时通过持续的抽水并观测便携式仪器，待各监测指标读数稳定后再收集水样。电导率（EC）、氧化还原电位（Eh）、水温和pH值等指标可在现场利用便携式仪器测定。采集到的水样存入取样瓶中密封，放入0~4 ℃的保温箱中保存运输回实验室待测。金属Mn、Na^+、K^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}和全铁使用电感耦合等离子体原子发射光谱法进行分析（ICP-OES Optima 5300DV型，最低检测限为1 ug·mL^{-1}）；HCO_3^-是通过酸碱指示剂滴定法来滴定测量；COD采用重铬酸盐法测定（最低检测限为0.05 mg·L^{-1}）；TDS利用重量法测得（电子天平MS204TS，最低检测限为4 mg·L^{-1}）；六价铬用电感耦合等离子体质谱法测量（ICP 3200型，最低检测限为0.004 mg·L^{-1}）；Cl^-、SO_4^{2-}、F^-与硝酸盐用离子色谱法测量（离子色谱仪Aquion，最低检测限依次为0.007 mg·L^{-1}、0.018 mg·L^{-1}、0.006 mg·L^{-1}、0.004 mg·L^{-1}）；总硬度（TH）使用乙二胺四乙酸二钠（EDTA-2Na）滴定法测定（最低检测限为0.05 mg·L^{-1}）；亚硝酸盐使用N-(1-萘基)-二乙胺光度法测定（分光光度计T6新悦，最低检测限为0.003 mg·L^{-1}）；氨氮用纳氏试剂分光光度法测定（紫外可见分光光度计TU-1950，最低检测限为0.025 mg·L^{-1}）。

3 结果与分析

3.1 煤矿开发对区域地下水化学影响

根据煤矿开发对地下水位的影响程度，把水位下降大于1 m的区域作为显著影响区，把水位降幅小于1 m的作为非影响区[19]，对60个水样分组（显著影响区24个，非影响区36个）分别进行统计分析。由统计结果可知（表1），伊敏盆地地下水整体上处于弱碱性环境，水的硬度比较大；显著影响区内pH平均值为7.20，非影响区为7.63；TDS和总硬度在非影响区存在超标现象。

盆地内铁锰离子超标最为严重，检测的最高浓度超过地下水III类水质标准的15倍，显著影响区内的铁锰离子均值浓度要比非影响区低。这是由于露天煤矿开采活动使原本封闭的地下水环境变得开放，导致含硫煤以及地层中赋存的硫铁矿（FeS_2）氧化产酸，促使矿区内的地下水中SO_4^{2-}和Fe^{2+}浓度升高以及pH降低。反应产生的Fe^{2+}会进一步氧化生成Fe^{3+}，继而形成$Fe(OH)_3$胶体并释放出H^+，进而让矿区环境的pH进一步降低。总体的反应方程式如下所示：

$$\begin{aligned}&4FeS_2(s)+14H_2O+15O_2\rightarrow\\&4Fe(OH)_3(s)+8SO_4^{2-}+16H^+\end{aligned}\qquad(1)$$

从方程（1）可以看出，FeS_2矿物在有充足氧气和水的作用下，理论上应该是能够全部反应生成$Fe(OH)_3$沉淀。然而，实际观测到的水环境中铁离子浓度却呈现出持续升高的趋势。这一现象的根源在于Fe^{3+}并未能全部转化为$Fe(OH)_3$沉淀[21]。

通常在煤矿层中锰主要以碳酸锰、氢氧化锰和锰的氧化物等化合物形式存在，而仅含有少量的菱锰矿与软锰矿[22]。由于非影响区的地下水pH呈现

表1　伊敏盆地水样主要水化学指标

Tab. 1　Main hydrochemical indexes of water samples in Yimin Basin

检测指标/(mg·L^{-1})	显著影响区						非影响区					
	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数/%	超标率/%	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数/%	超标率/%
pH	6.50	8.04	7.20	0.23	3.19	0	7.09	8.32	7.63	0.19	2.49	0
TDS	181.9	977	435.05	183.94	42.28	0	172.70	2380	749.97	535.19	71.36	17
K^+	1.33	11.95	5.50	2.55	46.36	–	1.58	22.90	7.01	5.25	74.89	–
Na^+	12.84	348.71	105.35	78.85	74.85	8	11.87	839.57	194.60	176.43	90.66	43
Ca^{2+}	8.30	84.63	49.95	16.77	33.57	–	33.62	317.17	73.28	47.13	64.31	–
Mg^{2+}	2.64	51.59	24.79	11.27	45.46	–	10.93	157.66	38.13	31.32	82.14	–
总硬度	31.86	334.51	228.59	73.39	32.11	0	129.98	1377.88	342.69	228.11	66.56	17
HCO_3^-	208.01	913.68	391.81	159.77	40.78	–	156.99	1356.91	481.82	220.14	45.69	–
Cl^-	5.58	127.95	46.61	31.14	66.81	0	5.58	660.25	126.50	135.31	106.96	9
SO_4^{2-}	5.76	268.56	79.40	62.46	78.66	4	5.76	961.65	186.31	222.96	119.67	14
COD	0.54	6.80	2.59	1.69	65.25	24	0.93	8.08	3.75	1.51	40.27	60
Fe^{2+}	L	0.70	0.13	0.16	123.08	–	L	2.00	0.44	0.53	120.45	–
Fe^{3+}	L	2.40	0.15	0.49	326.67	–	L	3.00	0.47	0.76	161.70	–
全铁	L	2.80	0.28	0.60	214.29	16	L	4.50	0.91	1.19	130.77	49
Mn^{2+}	L	2.49	0.44	0.57	129.55	84	L	2.40	0.53	0.61	115.09	60
NH_4^+	L	0.19	0.01	0.04	400.00	0	L	0.93	0.08	0.19	237.50	6
NO_3^-	L	33.90	2.27	6.66	293.39	0	L	1.20	0.10	0.24	240.00	11
NO_2^-	L	0.34	0.03	0.08	266.67	0	L	0.01	0	0	N/A	0

注：pH为无量纲量。超标率的统计标准按照《地下水质量标准》中的III类水质标准进行判断，"–"代表《地下水质量标准》中并无该项指标。"L"代表低于检测限下限。根据变异系数计算公式，"N/A"代表无法进行计算。

出弱碱性，使得含水层中锰以氧化物和氢氧化物的形态稳定保存下来。在显著影响区，由于含硫煤以及FeS_2矿物的氧化产生酸性物质，导致地下水pH值降低，这一环境条件的改变破坏了锰矿物的溶解平衡，使得Mn^{2+}从平衡体系中释放出来，进而导致锰离子浓度超标的现象。该反应方程式如下：

$$Mn(OH)_2 + MnO + MnCO_3 + 3H_2SO_4 \rightarrow 3Mn^{2+} + 3SO_4^{2-} + 4H_2O + CO_2 \quad (2)$$

虽然矿区采矿活动的氧化产酸有利于铁锰氧化物的溶解，但径流速度的提高并不容易使其积累。同样受到人类开采活动所导致地下水循环速度加快的影响，SO_4^{2-}、Na^+和Cl^-的检测超标率也体现在显著影响区明显低于非影响区。在非影响区域地下水中Na^+的含量较高，这是受到该地区的地形地貌影响，盆地北端作为地下水的径流排泄地带，浅水位及低流速的特性促使水分持续蒸发，而水中盐分在含水层中不断地累积，继而形成高TDS的Cl-Na型水。

盆地内地下水中COD指标超标严重，其中在非影响区内出现最高值为8.08 mg·L^{-1}，其平均值高于显著影响区，这说明该区域的有机质含量较高。在这种局部地下水环境中，氧化还原电位较低，仍维持在还原状态，因此形成了COD值较高的现象。与此相反的是，在显著影响区内地下水中的COD值有明显下降的趋势，由于矿场开采活动的干扰，原封闭环境发生了改变，使得地下水更容易与氧气接触，从而为有机物和还原性物质提供了良好的氧化降解环境。

盆地北部非影响区内由于地下水位埋深较浅（1.0~5.0 m），其更容易受到地表环境的影响，这使得畜牧养殖等活动过程中产生的污染物（如畜牧粪便）更容易渗入地下水中，导致了地下水中氨氮浓度异常升高。

3.2　伊敏盆地水化学特征成因

3.2.1　水化学类型演变　Piper三线图显示（图2），研究区地下水水化学类型主要分布在III和V区内（51个），并以HCO_3-Ca·Na型水为主。其余的水样水化学类型分布在II、IV和VI区域内，分别是Cl-Ca·Mg型水（3个），HCO_3-Na型水（1个），Cl-Na型水（5个）。开采显著影响区地下水化学类型主要集中在

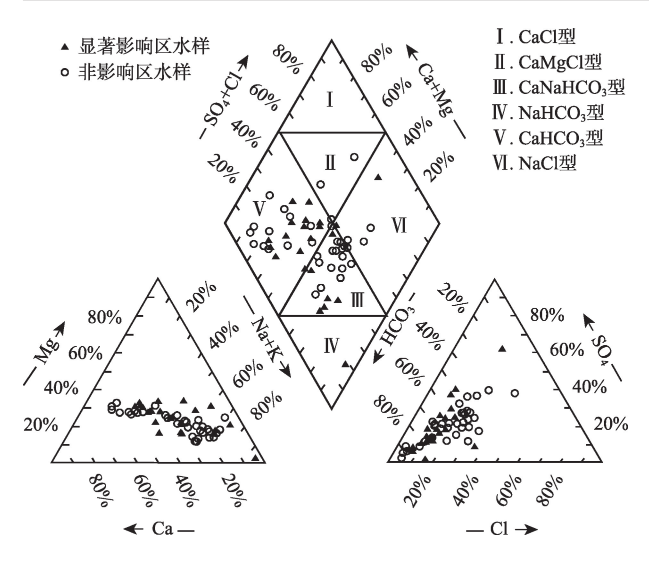


图2 研究区水样三线图

Fig. 2 Three-line diagram of water samples in the study area

Ⅴ区域内,非影响区地下水的水化学类型主要分布在Ⅲ和Ⅴ区域当中。由于受到煤矿区开发活动的影响,伊敏盆地内形成了以伊敏露天煤矿为中心的巨大地下水降落漏斗,漏斗中心与矿区开发前相比,水位降幅达114 m,影响面积达80 km^2。

将研究区按煤矿开采显著影响区和非影响区分别设置地下水流动路径断面来进行研究,所选取点位的水化学类型、TDS和典型离子氯离子浓度进行统计(图3)。从图3可知,沿着地下水流动路径上煤矿开采显著影响区内水化学类型是从HCO_3–Ca·Na型向HCO_3–Ca型转换;在非影响区内是从HCO_3–Ca·Na型向Cl–Ca·Mg型转变。在地下水流向的方向上,TDS和氯离子在显著影响区域内呈现出显著的下降趋势,而在非影响区域内则呈现出上升趋势。根据结果进行分析,TDS和氯离子明显受到开采活动所产生的影响,且离开采中心越近,显著影响区内水文循环速度越快,离子和矿物含量随之不断流失降低,相反在非影响区地下水流速相对缓慢,离子和矿物含量更容易进行累积。总体上煤矿开采疏排地下水明显增加了矿区地下水的流速,使矿区地下水盐分减少,水化学类型趋于简单。

Gibbs图显示(图4),盆地内地下水的$Na^+/(Na^++Ca^{2+})$比值主要分布在0.2~1.0之间,然而$Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$比值主要分布在0.02~0.4之间,并且主要集中0.2左右,TDS整体分布在10^2~10^3 mg·L^{-1}。研究区采矿显著影响区内的地下水化学特征主要受水–岩相互作用影响,随着采矿疏排地下水,地下水位下降,流速增快,水–岩互作用变强。在非影响区内,由于地形平坦,地下水流动迟缓,水位埋深较浅,受到蒸发浓缩作用的影响更明显。

3.2.2 *宏量离子浓度变化原因* 通过计算分析不同的离子浓度,将其在坐标系中进行展示,可以清晰地获取地下水中离子的分布比例,并以此来推断水化学形成的原因,进而帮助分析水文地球化学问题[23]。

从图5a可以发现无论是煤矿开采显著影响区还是非影响区水样的Na^+与Cl^-离子当量浓度之比主要处于1:1线的上方,表明水样中的Na^+的浓度要比Cl^-的高,这反映了Na^+还有其他的来源。而在自然情况下,Na^+和Cl^-大多是来自于岩盐的溶解作用,多出的一部分Na^+可能是由其他含钠矿物(如钠长石)的溶解或阳离子交换所形成[24]。通过对比两个区

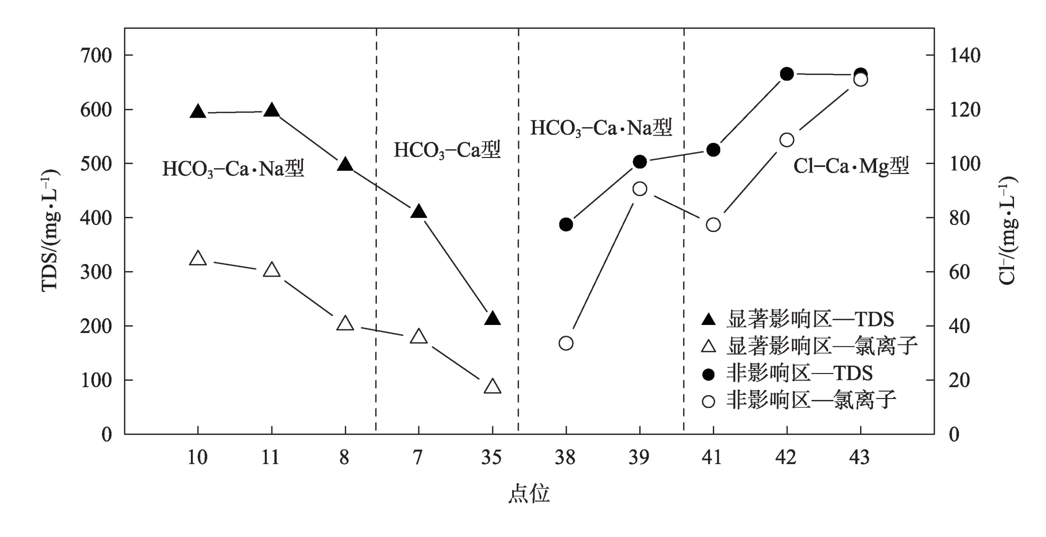


图3 研究区地下水流动路径上TDS、氯离子、水化学类型变化

Fig. 3 The changes of TDS, chloride ion and hydrochemical types in the groundwater flow path of the study area

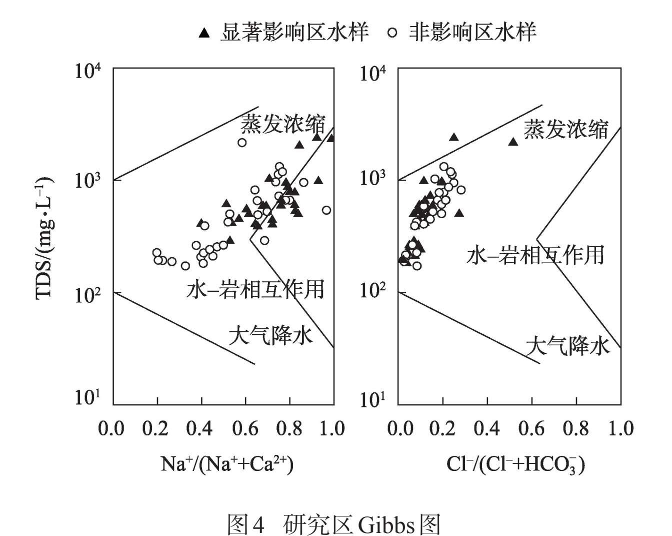


图4　研究区Gibbs图

Fig. 4　Gibbs diagram of the research area

域水样所拟合出来的直线斜率还可以看出，显著影响区域γ(Na^+)/γ(Cl^-)比值远高于非影响区，说明显著影响区其他含钠矿物的溶解或阳离子交换作用更加强烈。

γ(Ca^{2+})/γ(Mg^{2+})比值可以推测出Ca^{2+}、Mg^{2+}的来源[25]。从图5b中可以看出盆地内显著影响区和非影响区中的水样点所拟合的直线均处于1:1线和1:2线的中间。在显著影响区内有28%、非影响区内有31%的水样处于1:1线的附近可推测该部分水样中Ca^{2+}、Mg^{2+}是源于白云石的溶解[26]。其余显著影响区中61%的水样和非影响区中58%的水样介于两线之间，说明该部分的Ca^{2+}还与方解石、石膏等矿石风化溶解作用有关。

γ(SO_4^{2-}+HCO_3^-)/γ(Ca^{2+}+Mg^{2+})比值可以来推断地下水中水-岩相互作用的情况[27]。从图5c中可以看出，盆地内所有样点都处于1:1线的上方，可以推断该区地下水化学成分受到碳酸盐、硫酸盐矿物的溶解影响[28]。同时超出的SO_4^{2-}、HCO_3^-也表明了地下水中需要额外的Na^+、K^+来维持离子平衡，这也是证实图5a中Na^+含量比较高的原因之一。对比显著影响区和非影响区水样的拟合直线可以发现，两条直线的斜率均大于1，这表明两个区域均受到了水-岩相

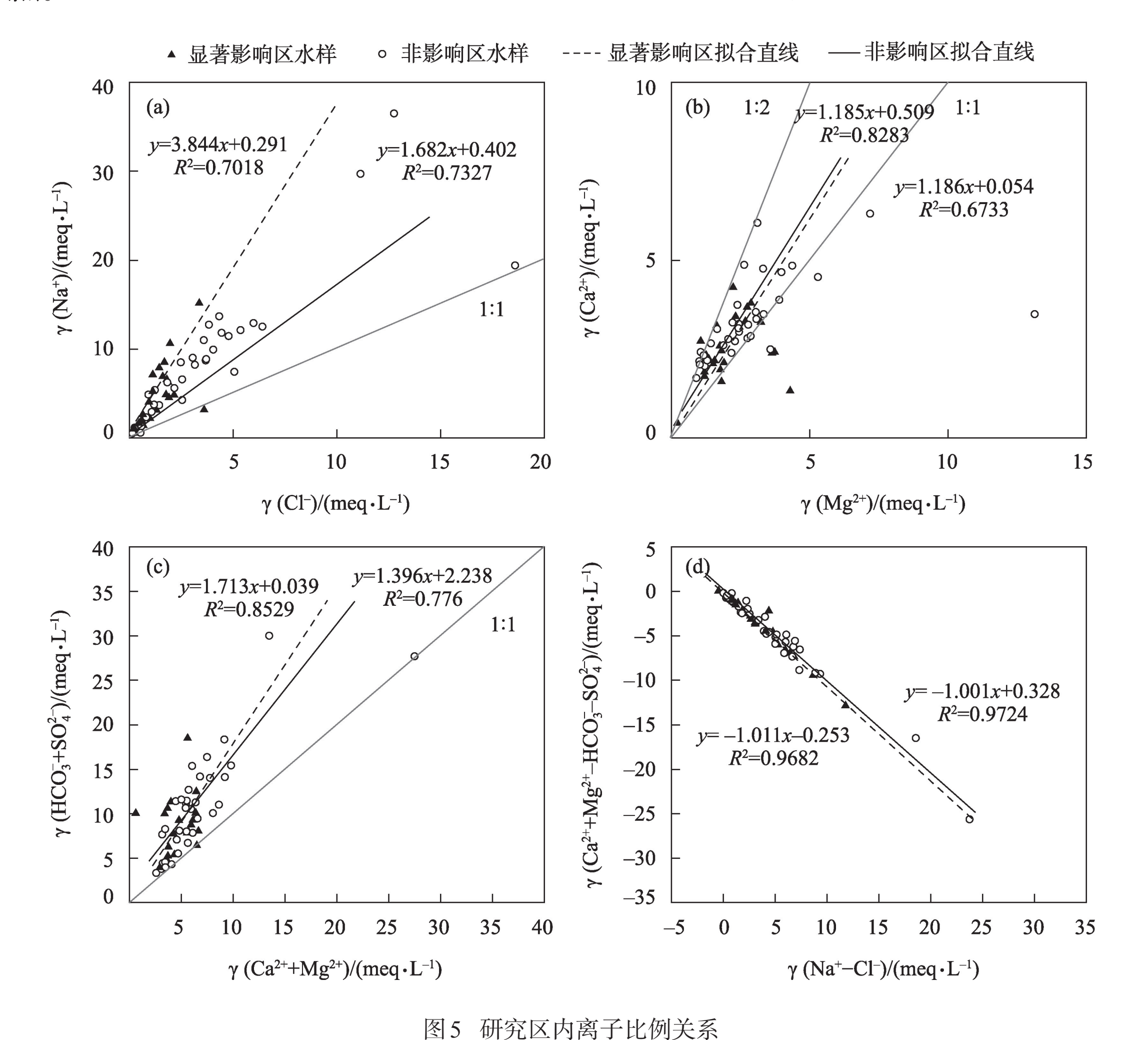


图5　研究区内离子比例关系

Fig. 5　Ion ratio diagram in the research area

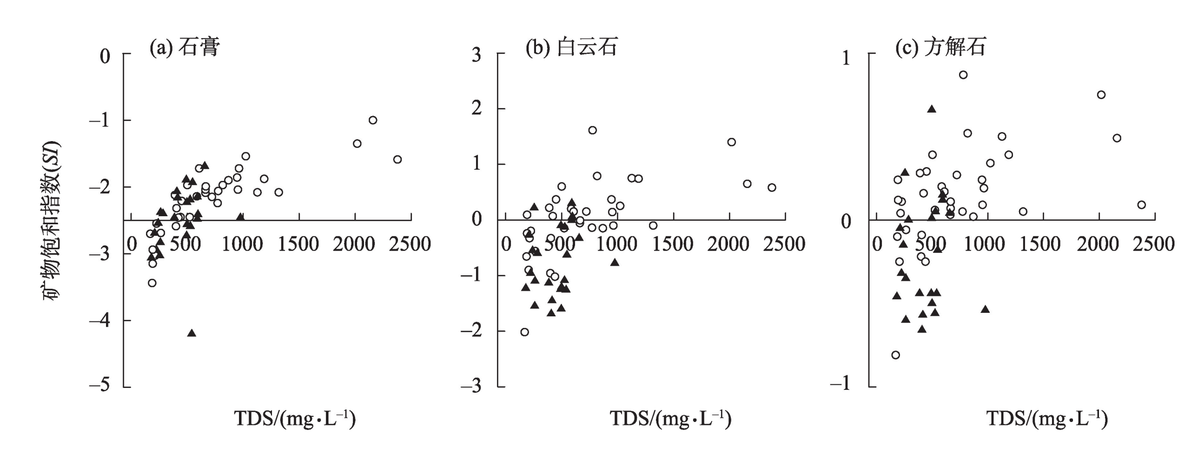


图6　石膏、白云石、方解石矿物饱和指数

Fig. 6　Saturation index diagram of gypsum, dolomite and calcite minerals

互作用的影响。其中，显著影响区的直线斜率1.713高于非影响区的1.396，表明在显著影响区水-岩相互作用更为强烈。

有研究表明，当γ(Ca^{2+}+Mg^{2+}−HCO_3^-−SO_4^{2-})/γ(Na^+−Cl^-)比值斜率越接近−1时，水体中发生的离子交换作用就越强烈[29]。图5d中显著影响区的γ(Ca^{2+}+Mg^{2+}−HCO_3^-−SO_4^{2-})/γ(Na^+−Cl^-)比值斜率为−1.011，非影响区的斜率为−1.001，两者均接近于−1，表明水样中Na^+的增加与Ca^{2+}+Mg^{2+}的减少紧密相关。伊敏盆地的地下水中存在着Ca^{2+}+Mg^{2+}置换吸附含水介质中Na^+的现象，促使Na^+浓度明显升高，这对地下水化学组分的变化起到了十分重要的作用。

3.2.3　*矿物饱和指数分析*　矿物饱和指数(*SI*)可以用来判断该矿物在当前地下水环境中是否仍具有溶解潜力[30-31]。矿物在水中的饱和指数的计算表达式为：

$$SI = \lg \frac{IAP}{K} \tag{3}$$

式中：*IAP*为离子活度积；*K*为某温度下的矿物平衡常数。

如果矿物的*SI*小于零，表明水中的矿物质浓度低于其在当前温度和压力下的饱和溶解度，这说明该矿物在当前地下水环境中仍具有溶解潜力，从而水体中的矿物质离子或分子有可能继续溶解直到达到饱和状态；相反当矿物的*SI*大于零时，表示水中的矿物质浓度超过了其在该温度和压力下的饱和溶解度，此时，这些矿物质离子或分子有可能相互聚集，形成沉淀物；而当矿物的*SI*等于零时，说明该矿物在地下水中溶解已恰好达到极限，并处于溶解平衡状态[32]。

从图6中可以看出，石膏的*SI*在显著影响区和非影响区内均为负值，说明该矿物在两个区域均有继续溶解的潜力。值得注意的是，在非影响区水样中大多数方解石和白云石的*SI*大于零，表明其处于过饱和状态，可能会在水中形成沉淀；反之，显著影响区水样中大部分方解石和白云石的*SI*小于零，表明其处于未饱和状态，两种矿石能够继续溶解。造成显著影响区和非影响区*SI*不同的原因是两区地下水的更新速度和经历的水文地球化学作用不同。前者因其地势平坦，地下水径流缓慢，因而更容易发生方解石和白云石的沉淀，所以表现为*SI*大于零；后者由于受采矿活动的影响地下水流速加快，水的更新速度加快，并伴随着含硫煤以及硫铁矿氧化产酸导致的pH值降低，其对方解石和白云石的溶解能力增强。

4　结　论

采矿活动影响伊敏盆地的显著影响区和非影响区展现出不同的水化学特征。

(1) 地下水pH在煤矿开采显著影响区域内平均值为7.20，非影响区为7.63，整体上表现为弱碱性。伊敏盆地地下水存在TDS、Na^+、SO_4^{2-}、NH_4^+、NO_3^-、COD、全铁和总硬度等超标问题，但显著影响区域内的超标情况明显低于非影响区。由于受煤矿开发活动的影响，伊敏盆地内形成了以矿坑为中心的地

下水降落漏斗，显著影响区内地下水水文循环速度相比于非影响区要明显更快，从而离子不容易在此累积，非影响区内由于其浅水位及低流速的特性，水分持续蒸发最终盐分和TDS呈不断上升的趋势。

（2）煤矿开采显著影响区地下水化学成分主要受到了水-岩相互作用影响，非影响区主要受到蒸发浓缩作用影响。显著影响区沿着地下水的流动路径水化学类型由HCO_3-Ca·Na型向HCO_3-Ca型变化，在非影响区内的水化学类型由HCO_3-Ca·Na型向Cl-Ca·Mg型转换。

（3）露天煤矿的开采活动使原本封闭的地下水环境变得开放，导致含硫煤以及地层中赋存的硫铁矿氧化产酸，并继此促使其他矿石发生溶解。地下水中的锰、铁、硫酸根大多来自于锰铁矿石的溶解，钙、镁主要来自于白云石和方解石等碳酸钙镁矿石的溶解。煤矿开采显著影响区和非影响区均受到离子交换作用的影响，该影响对地下水化学组分的变化起到了十分重要的作用。

参考文献(References)：

[1] 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 等. 永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4202-4210. [Kong Xiaole, Yang Yonghui, Cao Bo, et al. Hydrochemical characteristics and factors of surface water and groundwater in the upper Yongding River Basin[J]. Environmental Science, 2021, 42(9): 4202-4210.]

[2] Aris A Z, Abdullah M H, Kim K W, et al. Hydrochemical changes in a small tropical island's aquifer: Manukan island, Sabah, Malaysia[J]. Environmental Geology, 2009, 56(8): 1721-1732.

[3] 丁启振, 雷米, 周金龙, 等. 博尔塔拉河上游河谷地区水化学特征及水质评价[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 829-840. [Ding Qizhen, Lei Mi, Zhou Jinlong, et al. An assessment of groundwater, surface water, and hydrochemical characteristics in the upper valley of the Bortala River[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 829-840.]

[4] 白凡, 周金龙, 曾妍妍. 吐鲁番盆地平原区地下水水化学特征及水质评价[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 419-428. [Bai Fan, Zhou Jinlong, Zeng Yanyan. Hydrochemical characteristics and quality of groundwater in the plains of the Turpan Basin[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 419-428.]

[5] 王雨婷, 李俊霞, 薛肖斌, 等. 华北平原与大同盆地原生高碘地下水赋存主控因素的异同[J]. 地球科学, 2021, 46(1): 308-320. [Wang Yuting, Li Junxia, Xue Xiaobin, et al. Similarities and differences of main controlling factors of natural high lodine groundwater between North China plain and Datong basin[J]. Earth Science, 2021, 46(1): 308-320.]

[6] 任晓辉, 吴玺, 高宗军, 等. 酒泉东盆地地下水化学特征及成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(10): 109-116. [Ren Xiaohui, Wu Xi, Gao Zongjun, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanisms of groundwater in Jiuquan east basin [J]. Resources and Environment in Arid Areas, 2019, 33(10): 109-116.]

[7] Rybakov Y S, Dal'kov M P, Kaibichev I A, et al. Extraction of contaminant metals from dumped metacolloid ores in order to reduce their hazardousness[J]. Russian Journal of Applied Chemistry, 2016, 89(3): 374-380.

[8] 叶凯, 孙玉川, 贾亚男, 等. 岩溶地下水水体中有机氯农药和多氯联苯的残留特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2020, 41 (12): 5448-5457. [Ye Kai, Sun Yuchuan, Jia Yanan, et al. Residual characteristics and health assessment analysis of OCPs and PCBs in karst groundwater[J]. Environmental Sciences, 2020, 41 (12): 5448-5457.]

[9] 王强民, 靳德武, 王文科, 等. 榆神矿区地下水和干旱指数对植被耗水的联合影响[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 841-847. [Wang Qiangmin, Jin Dewu, Wang Wenke, et al. Joint effects of groundwater and aridity index on the transpiration of vegetation: A case study in the Yushen mining area[J]. Coal Journal, 2019, 44(3): 841-847.]

[10] 杨秋, 曹英杰, 张宇, 等. 闭坑铅锌矿区地下水—矿坑水水化学特征及成因分析[J]. 生态环境学报, 2023, 32(2): 361-371. [Yang Qiu, Cao Yingjie, Zhang Yu, et al. Hydrochemical characteristics and its cause analysis of groundwater and mine water in closed lead zinc mining area[J]. Journal of Ecological Environment, 2023, 32(2): 361-371.]

[11] 陈陆望, 许冬清, 殷晓曦, 等. 华北隐伏型煤矿区地下水化学及其控制因素分析——以宿县矿区主要突水含水层为例[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 996-1004. [Chen Luwang, Xu Dongqing, Yin Xiaoxi, et al. Analysis on hydrochemistry and its control factors in the concealed coal mining area in North China: A case study of dominant inrush aquifers in Suxian mining area[J]. Journal of Coal, 2017, 42(4): 996-1004.]

[12] 涂婷, 王月, 安达, 等. 赣南稀土矿区地下水污染现状、危害及处理技术与展望[J]. 环境工程技术学报, 2017, 7(6): 691-699. [Tu Ting, Wang Yue, An Da, et al. Present situation, hazard and treatment technology of groundwater pollution in rare earth mining area of southern Jiangxi[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2017, 7(6): 691-699.]

[13] Tarasenko I, Kholodov A, Zin'kov A, et al. Chemical composition of groundwater in abandoned coal mines: Evidence of hydrogeochemical evolution[J]. Applied Geochemistry, 2022, 137(37): 105210.

[14] Qiao X, Li G, Li M, et al. Influence of coal mining on regional karst groundwater system: A case study in west mountain area of Taiyuan City, northern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(6): 1525-1535.

[15] Monika, Govil H, Guha S. Underground mine deformation monitor-

ing using synthetic aperture radar technique: A case study of Rajgamar coal mine of Korba Chhattisgarh, India[J]. Journal of Applied Geophysics, 2023, 209(32): 104899.

[16] Kumar R, Sharma S, Ansari I, et al. Study on the impact of leaching from coal OB dumps on groundwater quality using toxic elements transport modeling[J]. Sustainable Mining Practices, 2017, 11(13): 185−195.

[17] Fallavena V L V, Pires M, Ferrarini S F, et al. Evaluation of zeolite/backfill blend for acid mine drainage remediation in coal mine [J]. Energy & Fuels, 2018, 32(2): 2019−2027.

[18] 夏蔓宏, 董少刚, 刘白薇, 等. 典型草原露天煤矿区地下水−湖泊系统演化[J]. 湖泊科学, 2020, 32(1): 187−197. [Xia Manhong, Dong Shaogang, Liu Baiwei, et al. Evolution of groundwater-lake system in typical open-pit coal mine area[J]. Lake Science, 2020, 32(1): 187−197.]

[19] 冯海波, 董少刚, 张涛, 等. 典型草原露天煤矿区地下水环境演化机理研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(1): 163−172. [Feng Haibo, Dong Shaogang, Zhang Tao, et al. Evolution mechanism of a groundwater system in the opencast coalmine area in the typical prairie[J]. Hydrogeological Engineering Geology, 2019, 46(1): 163−172.]

[20] Dong S, Feng H, Xia M, et al. Spatial-temporal evolutions of groundwater environment in prairie opencast coal mine area: A case study of Yimin coal mine, China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2020, 42(10): 3101−3118.

[21] Liu B, Tang Z, Dong S. Vegetation recovery and groundwater pollution control of coal gangue field in a semi-arid area for a field application[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2018, 128(27): 134−140.

[22] Larsen D, Mann R. Origin of high manganese concentrations in coal mine drainage, eastern Tennessee[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2005, 86(3): 143−163.

[23] Zheng Q, Ma T, Wang Y, et al. Hydrochemical characteristics and quality assessment of shallow groundwater in Xincai River Basin, northern China[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2017, 17 (9): 368−371.

[24] An Y, Lu W. Hydrogeochemical processes identification and groundwater pollution causes analysis in the northern Ordos cretaceous basin, China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2017, 40(4): 1209−1219.

[25] 于开宁, 田剑, 刘景涛, 等. 兰州市地下水化学特征及演化模拟[J]. 地质与勘探, 2022, 58(4): 895−904. [Yu Kaining, Tian Jian, Liu Jingtao, et al. Hydrochemical characteristics and evolution simulation of groundwater in Lanzhou City[J]. Geology and Exploration, 2022, 58(4): 895−904.]

[26] 王攀, 靳孟贵, 路东臣. 河南省永城市浅层地下水化学特征及形成机制[J]. 地球科学, 2020, 45(6): 2232−2244. [Wang Pan, Jin Menggui, Lu Dongchen. Hydrogeochemistry characteristics and formation mechanismof shallow groundwater in Yongcheng City, Henan Province[J]. Geoscience, 2020, 45(6): 2232−2244.]

[27] 栾风娇, 周金龙, 贾瑞亮, 等. 新疆巴里坤−伊吾盆地地下水水化学特征及成因[J]. 环境化学, 2017, 36(2): 380−389. [Luan Fengjiao, Zhou Jinlong, Jia Ruiliang, et al. Hydrochemical characteristicsand formation mechanism of groundwater in plain areas of Barkol-Yiwu basin, Xinjiang[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(2): 380−389.]

[28] 李玉山, 李惠平, 王虎, 等. 河西堡化工园区地下水化学特征与高氟水成因机制[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(12): 119−126. [Li Yushan, Li Huiping, Wang Hu, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of high-fluorine groundwater in the Hexibu chemical industrial park[J]. Resources and Environment in Arid Areas, 2022, 36(12): 119−126.]

[29] Chitsazan M, Aghazadeh N, Mirzaee Y, et al. Hydrochemical characteristics and the impact of anthropogenic activity on groundwater quality in suburban area of Urmia City, Iran[J]. Environment Development and Sustainability, 2017, 21(1): 331−351.

[30] 张怀胜, 蔡五田, 边超, 等. 衡水市桃城区浅层高氟地下水水化学特征与成因分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(24): 10191−10198. [Zhang Huaisheng, Cai Wutian, Bian Chao, et al. Hydrochemical characteristics and genetic analysis of shallow high-fluorine groundwater in Taocheng district, Hengshui City[J]. Science and Technology and Engineering, 2021, 21(24): 10191−10198.]

[31] 张敏, 董少刚, 张文琦, 等. 红碱淖流域湖泊−地下水系统水化学特征及成因[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(5): 102−109. [Zhang Min, Dong Shaogang, Zhang Wenqi, et al. Hydrochemical characteristics and genesis of lake-groundwater system in the Hongjiannao Basin[J]. Resources and Environment in Arid Areas, 2022, 36(5): 102−109.]

[32] 邹嘉文, 刘飞, 张靖坤. 南水北调典型受水区浅层地下水水化学特征及成因[J]. 中国环境科学, 2022, 42(5): 2260−2268. [Zou Jiawen, Liu Fei, Zhang Jingkun. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in typical water receiving areas of the south-to-north water diversion project[J]. Environmental Science of China, 2022, 42(5): 2260−2268.]

Hydrochemical characteristics and genesis of groundwater in the Yimin Basin, Inner Mongolia

WANG Pingshun[1,2], MIAO Xinyue[3], YAN Yaping[4],
DONG Shengwang[5], DONG Shaogang[1,2]

(1. School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, Inner Mongolia, China; 2. Key Laboratory of River and Lake Ecology of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010021, Inner Mongolia, China; 3. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, Heilongjiang, China; 4. Inner Mongolia Academy of Ecological Environment Science Co., Ltd., Hohhot 010015, Inner Mongolia, China; 5. Inner Mongolia First Hydrogeological Engineering Geological Exploration Co., Ltd., Hohhot 010020, Inner Mongolia, China)

Abstract: Mining activities have strongly changed the characteristics of the regional hydrological cycle and have a significant impact on the chemical characteristics of groundwater. Revealing the evolutionary characteristics of the groundwater system under the influence of coal mine development can provide theoretical support for ecological environment protection and sustainable development in coal mine areas. In this paper, taking the Yimin Basin in Inner Mongolia as an example, based on hydrogeological investigation combined with the groundwater flow system theory, Piper three-line diagram, Gibbs diagram, ion proportional coefficient, mineral saturation index, and other analysis methods, the characteristics of groundwater chemical changes under the interference of coal mining activities were explored. Results indicate that the overall water environment in the study area is weakly alkaline, and the significant influence and noninfluence zones exceed the detection indexes in different degrees. Coal mining in the basin has accelerated the rate of regional hydrological cycle, causing the water quality in the significant impact zone to evolve toward desalination. The development of open-pit coal mining has opened up the previously closed groundwater system, and a series of water-rock interactions stimulated by the oxidation of sulfur-containing coal and sulfurous iron ore and acid production primarily cause the changes in the chemical characteristics of the regional groundwater. The hydrochemistry of groundwater in the basin is affected by evaporation, concentration and water-rock interactions. Along the flow direction of groundwater, the hydrochemical type in the significantly affected area changes from HCO_3−Ca·Na type to HCO_3−Ca, and the concentrations of TDS and Cl^- show a downward trend. In the nonaffected zone, the hydrochemical type changed from HCO_3−Ca·Na to Cl−Ca·Mg, and the concentrations of TDS and Cl^- showed an upward trend.

Keywords: groundwater; hydrochemical characteristics; impact of human activities; water-rock interaction; Yimin Basin